

Cámara de Niebla Salina Para Pruebas de Corrosión con Pulverizadores Piezoeléctricos

Salt Fog Chamber for Corrosion Testing with Piezoelectric Sprayers

Hector Daniel Hidalgo-Leal

Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta, Tabasco, México
E-mail: hector.hl@laventa.tecnm.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9028-8711>

Rosendo López González

Laboratorio de Nanotecnología, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco-DAIA, Cunduacán,
Tabasco, México
E-mail: rosendo.lopez@ujat.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6850-8973>

Fabiola Cruz-Gutiérrez

Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta, Tabasco, México
E-mail: faby.cg@laventa.tecnm.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2577-7265>

Gloria Susana Villalobos-Rodríguez

Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta, Tabasco, México
E-mail: gsusana.vr@laventa.tecnm.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9817-4196>

Resumen

Las pruebas aceleradas de corrosión son esenciales para el diseño de estructuras metálicas empleadas en ambientes con altas concentraciones de NaCl. La cámara de niebla salina es un equipo de laboratorio que proporciona una atmosfera corrosiva controlada. En este trabajo se propone el uso de discos piezoeléctricos para la pulverización de la solución, sustituyendo los equipos tradicionales que emplean aire comprimido, lo que reduce el volumen y costo. Para la implementación de los dispositivos propuestos, se ha integrado el uso de sensores, una resistencia calefactora de 250 W y una interfaz con pantallas de cristal líquido para monitorear las variables de interés, incluyendo tres microcontroladores Arduino que son programados para procesar los datos obtenidos. Los resultados experimentales indican que la propuesta permite un control preciso de la humedad y la temperatura con un bajo consumo energético de menos de 25W, además de una producción uniforme de las partículas de aerosol suspendido. Se concluye que la tecnología piezoeléctrica es capaz de sustituir al sistema de compresión de aire, asimismo ofrece una alternativa para pulverizar la solución salina, con una menor potencia y costo.

Scientific Research Journal

Palabras Clave

Cámara de niebla Salina, Prueba de corrosión, Microcontrolador Arduino.

Abstract

Accelerated corrosion tests are essential for the design of metallic structures used in environments with high NaCl concentrations. The salt spray chamber is laboratory equipment that provides a controlled corrosive atmosphere. In this work, the use of piezoelectric discs for the pulverization of the solution is proposed, replacing the traditional equipment that uses compressed air, which reduces the volume and cost. For the implementation of the proposed devices, the use of sensors, a 250 W resistance heater and an interface with liquid crystal displays to monitor the variables of interest are integrated, including three Arduino microcontrollers that are programmed to process the data obtained. The experimental results indicate that the proposal allows a precise control of humidity and temperature with a low power consumption of less than 25W, in addition to a uniform production of the suspended aerosol particles. It is concluded that piezoelectric technology is capable of replacing the air compression system, it also offers an alternative to spray the saline solution, with less power and cost.

Keywords

Salt spray chamber, Corrosion test, Arduino Microcontroller.

Zusammenfassung

Beschleunigte Korrosionsprüfungen sind für die Auslegung von Metallkonstruktionen, die in Umgebungen mit hohen NaCl-Konzentrationen eingesetzt werden, unerlässlich. Die Salzsprühkammer ist ein Laborgerät, das eine kontrollierte korrosive Atmosphäre bietet. In dieser Arbeit wird die Verwendung von piezoelektrischen Scheiben für das Sprühen von Lösungen vorgeschlagen, die die traditionellen Geräte mit Druckluft ersetzen, was das Volumen und die Kosten reduziert. Für die Implementierung der vorgeschlagenen Geräte wurden Sensoren, ein 250-W-Heizwiderstand und eine Schnittstelle mit Flüssigkristallanzeigen zur Überwachung der interessierenden Variablen integriert, einschließlich dreier Arduino-Mikrocontroller, die zur Verarbeitung der erhaltenen Daten programmiert werden. Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass der Vorschlag eine präzise Steuerung von Luftfeuchtigkeit und Temperatur bei einem geringen Stromverbrauch von weniger als 25 W sowie eine gleichmäßige Produktion von Aerosol-Schwebstoffteilchen ermöglicht. Die Schlussfolgerung ist, dass die piezoelektrische Technologie in der Lage ist, das Luftkompressionssystem zu ersetzen und eine Alternative für das Versprühen der Salzlösung mit geringerer Leistung und geringeren Kosten bietet.

Schlüsselwörter

Salzsprühkammer, Korrosionstest, Arduino-Mikrocontroller.

1. Introducción

La corrosión produce en las estructuras concentraciones de esfuerzos, fugas en tanques reservorios, anomalías en el funcionamiento de máquinas y contaminación de productos. La cámara de niebla salina es un equipo especializado en pruebas aceleradas, para determinar las características y propiedades de un material; y así establecer si es apropiado para una aplicación específica. Tradicionalmente las cámaras utilizan aire comprimido, lo que hace necesario el uso de dispositivos adicionales como bombas, válvulas, filtros y reguladores, además de que esto conlleva un consumo de potencia eléctrica considerable. El objetivo de este trabajo es reducir el costo, volumen y energía, sustituyendo la aspersion tradicional con una pulverización en alta frecuencia proporcionada por discos piezoeléctricos, los cuales son alimentados con voltajes de corriente directa de entre 12 V y 48 V.

2. Estado del arte o Marco Teórico

2.1 Discos piezoeléctricos

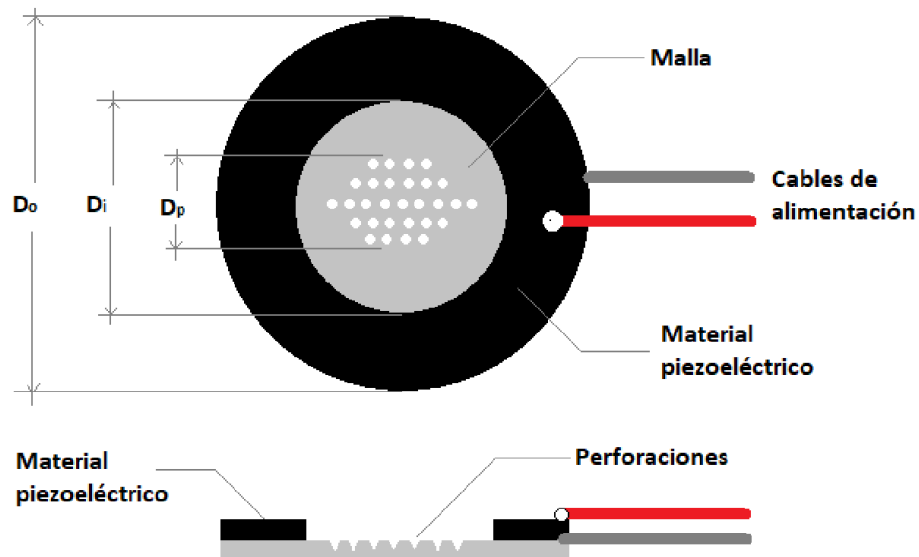
Los actuadores y sensores basados en el efecto piezoeléctrico transforman la tensión mecánica y la vibración en energía eléctrica, por ello, en los últimos años se ha considerado como una alternativa sustentable para edificios (Chandra Sekhar et al., 2021). De forma inversa si se aplica una diferencia de potencial o voltaje se produce una vibración, la cual es aprovechada como atomizador para propósitos de dosificación o refrigeración (Mirzabe et al., 2022). Las ventajas mas notables de este tipo de dispositivos es su construcción simple, su tamaño compacto y su bajo costo (Yan et al., 2021).

Los discos basados en este fenómeno físicamente constan de una malla formada por una placa delgada de 50 μm de espesor con perforaciones cónicas distribuidas de 3 μm de diámetro dentro de un área circular D_p ; además de un espesor del material piezoeléctrico

de 0.63 mm, con un diámetro interior D_i y un diámetro exterior D_o (Guerra-Bravo et al., 2021). Una estructura típica de un disco atomizador se muestra en la figura 1.

Figura 1

Diagrama esquemático de las partes principales de un disco piezoeléctrico.



Nota. El color gris claro indica la posición de la malla y los círculos de color blanco indican la distribución de las micro perforaciones. Adaptada de (Guerra-Bravo et al., 2021).

Cuando el disco se encuentra en funcionamiento se produce un doble periódico sobre la malla permitiendo el paso del fluido o solución. Esta deformación depende de la magnitud y frecuencia de la forma de onda de voltaje aplicado. (Sirohi & Mahadik, 2011) afirman que la relación matemática entre el esfuerzo mecánico, deformación mecánica, campo y desplazamiento eléctrico se establece como:

$$\sigma = [C^E] \cdot \varepsilon - [e] \cdot E,$$

$$D = [e]^T \cdot \varepsilon + [\xi^S] \cdot E$$

donde el exponente S indica que los valores son medidos a una tensión constante y E significa que son medidos a un campo eléctrico constante, σ es el tensor de esfuerzos, D es el vector de desplazamiento eléctrico, ε es el tensor de tensiones, E es el campo eléctrico,

$[C^E]$ es la constante elástica a un cierto campo eléctrico constante, $[e]$ es el coeficiente de tensión piezoeléctrico y $[\xi^S]$ es el tensor dieléctrico a cierta tensión mecánica constante. El balance mecánico y eléctrico de las ecuaciones antes descritas para elementos cerámicos piezoeléctricos se define como:

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u} &= \nabla \cdot \sigma, \\ \nabla \cdot D &= 0\end{aligned}$$

donde ρ es la densidad y \ddot{u} es la aceleración al someter la malla a un desplazamiento. Por otro lado, el caudal que es capaz de atomizar el disco depende de la frecuencia de vibración (Lima-Rodriguez et al., 2019). La frecuencia natural depende de las dimensiones físicas por lo que se puede calcular con la ecuación:

$$f = \frac{\alpha h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}$$

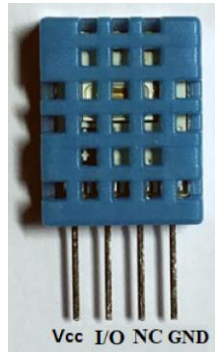
donde R es el radio, h es el espesor, E es el modulo de Young, ν es la relación de Poisson y α es una constante que depende de la relación entre el espesor del material y el área sin desplazamiento.

2.2 Medición de temperatura y humedad con Arduino

La necesidad de medir las variables que intervienen en el análisis de la corrosión en una cámara de pruebas ha llevado a la colaboración de disciplinas como la Química y la Electrónica. Los elementos de medición deben ser capaces de soportar las atmosferas corrosivas, además de ser robustos y proporcionar una buena repetibilidad. Una solución de bajo costo para medir la humedad relativa propuesta por (Malook et al., 2020; Novoa Jerez et al., 2019), consiste en el uso de un sensor DTH11, el cual es un dispositivo digital que proporciona cierta resistencia a los efectos de ruido, tamaño compacto y tiempo de respuesta de aproximadamente un segundo. En la figura 2, se presenta físicamente incluyendo sus terminales de conexión.

Figura 2

Representación física del sensor DTH11 y sus terminales de conexión.



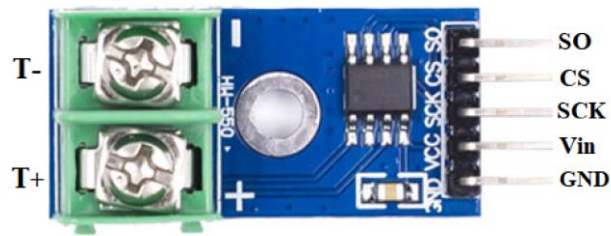
Nota. VCC: alimentación, I/O: transmisión de datos, NC: no se conecta, GND: conexión a tierra. Fuente: elaboración propia.

Debido a que se requiere de un protocolo de comunicación para decodificar la información transmitida por los sensores, es recomendable el uso de Microcontroladores, tal es el caso del Arduino empleado en los trabajos (B. Susa, 2020; Santra et al., 2018). En el caso de la temperatura, aunque el DTH11 también ofrece la posibilidad de medir la misma, no es recomendable debido a que se requiere de un controlador en lazo cerrado, cuya respuesta debe ser rápida para mantener el error en estado estable debajo del 2%, ya que este es el porcentaje recomendado para procesos industriales y equipo especializado.

Para abordar el problema (bin Li & Jinhui Lei, 2011) sugiere el uso de termopares para medir la temperatura con una respuesta más rápida, además estos sensores deben contar con una etapa de acondicionamiento y una Interfaz Periférica Serial (SPI por sus siglas en inglés) como protocolo de comunicación. El MAX6675 es un modulo interfaz con termopar tipo K que cumple con todos estos requisitos, asimismo integra un convertidor analógico-digital, por lo que es fácil adaptarlo a cualquier sistema embebido, sus terminales de conexión se pueden apreciar en la figura 3.

Figura 3

Modulo para termopar tipo K con sus terminales de conexión.



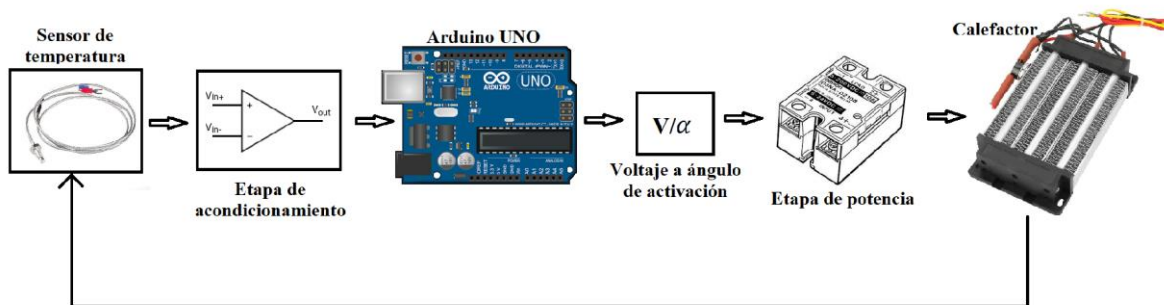
Nota. T- y T+ son las terminales de conexión del termopar; SO, CS, SCK, Vin y GND son las terminales de alimentación y comunicación. Fuente: elaboración propia.

2.3 Control de temperatura

Los sistemas de control son elementos indispensables para regular y mantener de forma estable a cierta variable. En el caso de los controladores de temperatura los investigadores han propuesto muchas formas de implementar y adaptar la entrada de control a las resistencias calefactoras. Técnicas como el control por ángulo de fase o el recorte de los ciclos en proporción, sin embargo esta última requiere de un sistema complejo de cálculo para determinar la cantidad adecuada de potencia suministrada. (Supriyo et al., 2018) presenta un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) en lazo cerrado implementado en un microcontrolador Arduino. Una descripción del sistema representado en bloques se muestra en la figura 4.

Figura 4

Diagrama de bloques del controlador de temperatura.



Nota. Adaptado de (Supriyo et al., 2018).

3. Materiales y métodos

3.1 Enfoque y tipo de investigación

El presente proyecto considera un enfoque mixto, considerando el análisis de resultados obtenidos, tanto en cantidades escalares (datos cuantitativos), como el desempeño y/o características (datos cualitativos) obtenidas en el estudio utilizando la cámara.

El tipo de investigación empleado es documental, experimental y aplicada. Se tiene en la primera etapa fue necesaria la revisión documental para poder llevar a cabo el diseño tanto de la estructura de la cámara como de los sistemas de control, así como la selección del dispositivo embebido adecuado y demás circuitería, posteriormente se llevó a cabo investigación de tipo experimental y de campo, al realizar las pruebas al prototipo, que se cumpliera con los requerimientos establecidos al principio.

3.2 Fuentes de investigación

Las fuentes de investigación utilizadas fueron libros, normas, tesis, artículos, así como también las entrevistas a los investigadores colaboradores de este trabajo, quienes al ser expertos en el tema, proporcionaron información de primera mano.

3.3 Métodos Utilizados

- Documentación sobre el tema.
- Determinación de los materiales y equipos necesarios.
- Diseño de la solución del problema.
- Implementación de la propuesta de solución
- Validación del prototipo.

3.4 Instrumentos para la recolección de datos

Dentro de los instrumentos de recolección de datos se tienen la revisión de documentos, observación, el muestreo, la entrevista realizada a los investigadores.

Los materiales y equipos empleados para dicho procedimientos se tiene: Equipo de Cómputo, Fuentes de alimentación de CD, y demás equipo de fabricación de acuerdo con las etapas del proyecto.

3.5 Desarrollo de la Metodología

3.5.1 Documentación del tema:

Con la información obtenida en el proceso de revisión documental, se determinaron los valores y parámetros que debe cumplir el prototipo a construir, mismo que permitió la selección de los materiales y elementos que se pretenden utilizar en la construcción de la cámara de niebla salina, basándose en las condiciones establecidas por la norma ASTM B-117 y las exigencias que ahí se imponen.

3.5.2 Diseño de la cámara:

Las consideraciones del Diseño son:

- Se debe seguir las restricciones y condiciones establecidas por la norma ASTM B – 117-11 “Salt spray (Fog) test” de la ASTM.

- El prototipo tiene que ser confiable y seguro.
- El tiempo máximo de duración de los ensayos realizados por el prototipo, deben ser de 7 días (168 horas), considerando lo establecido por la norma ASTM B – 117-11 “Salt spray (Fog) test.
- Las medidas del prototipo deben ser de valores muy cercanos a lo que se encuentra comercialmente, pero considerando que sea de fácil manejo y tamaño reducido.
- El prototipo tiene que poseer la mayor autonomía posible.

3.5.3 Selección de los materiales:

En este apartado se seleccionaron y analizaron los materiales para la cámara de niebla salina, los cuales estarán sometidos al ambiente corrosivo, alta humedad y a cambios de temperatura. Las consideraciones para tomar en cuenta para la selección del material de la cámara son:

- Impermeabilidad.
- Bajo índice de adsorción de agua.
- Resistencia a la corrosión.
- Acabado superficial liso.
- Resistencia a golpes.
- Visibilidad.
- Resistencia a temperatura de trabajo.

De acuerdo con la literatura revisada, se reportó que las cámaras existentes en el mercado se encuentran elaboradas empleando resina poliéster con acabado suave y reforzado con fibra de vidrio, pero cabe destacar que atendiendo a la norma ASTM B-117, esta permite la elección de los materiales siempre y cuando cumpla con las exigencias de la norma, en la construcción de la cámara. Para este diseño se seleccionó el acrílico, dado que sus características hacen que sean materiales ideales para el proyecto a pesar de tener algunas negatividades. La tabla 1 presenta las propiedades generales del acrílico.

Tabla 1*Propiedades generales del acrílico.*

Propiedad	Valor	Unidad	Modelo de Prueba (ASTM)
Mecánicas			
Peso específico.	1,19		D-792
Resistencia a la tensión.	700	Kg/cm	D-638
Resistencia a la tensión a -40 °C.	950	Kg/cm	D-638
Resistencia a la tensión a +70°C.	350	Kg/cm	D-638
Elongación de ruptura.	2 - 4	%.	D-638
Módulo de elasticidad a la tracción.	30.000 – 32.000	Kg/cm	D-638
Resistencia a la flexión.	1.020	Kg/cm	D-790
Módulo de flexión.	28.600	Kg/cm	D-790
Resistencia a la compresión.	1.020	Kg/cm	D-695
Módulo de resistencia a la compresión.	21.420	Kg/cm	D-695
Resistencia al impacto (Izod).	1 - 2	Kg/cm	D-256(Met. A)
Resistencia al impacto (Charpy).	20 - 30	Kg/cm	D-256(Met. B)
Resistencia al cizallamiento.	630	Kg/cm	D-732
Dureza a la penetración Rockwell.	M 90 - 100		D-785
Dureza a la penetración Barcoll.	50 - 52		D-2583
Resistencia a la abrasión. (500g.,100ciclos).	4		D-1044
Térmicas.			
Autoignición	420	°C.	D-1929
Calor específico.	0,35	Cal/g, °C.	

Nota. Adaptado de (Reyes, 2021).

3.5.4 Estructura de la cámara

En este apartado es donde se especifica la estructura de la cámara y de la cubierta, con el objetivo de lograr dar seguridad cuando se requiere introducir las probetas, desplazar de un lugar a otro o golpes causados por un descuido o accidente. Estará construida con ángulo de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Dicho material se encuentra en cualquier ferretería y se puede

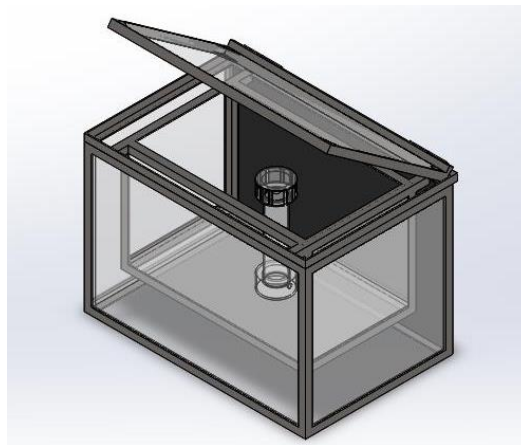
soldar con cualquier equipo de soldadura, el material es resistente, es ligero y la estructura es dura, su costo es relativamente bajo comparado con otros materiales y estéticamente no obstruye la visibilidad de la cámara ni la del proceso que se desarrollara dentro de ella. Para formar el marco de la base y la cubierta se cortan los extremos de los ángulos a 45° de modo que ambos ángulos se ensamblen perfectamente y se repetirá hasta formar un marco completo. La estructura metálica debe ser pintada con anticorrosivo. En la figura 5 se muestra el diseño que deberá construirse.

Para la selección del material de la estructura se consideran los siguientes factores.

- Bajo costo.
- Alto grado de rigidez estructural.
- Tamaño de la cámara.
- Tamaño de la cubierta removible.
- Resistente a cambios de temperatura y/o humedad en el ambiente.
- Facilidad de soldar.

Figura 5

Estructura de la cámara de niebla salina.



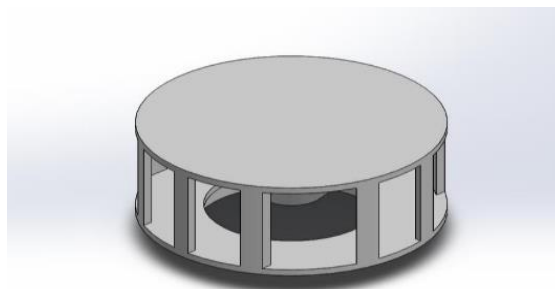
Nota. Adaptado de (Reyes, 2021).

3.5.5 Distribución de la niebla salina

Este sistema está constituido por los siguientes elementos: un tanque el cual es el depósito de agua salina, un atomizador, línea de suministro de aire húmedo a presión, línea de suministro de agua salina y un Piezoeléctrico. El atomizador y la base del piezoeléctrico se presentan en las figuras 6 y 7. El tanque de reserva está conectado una línea que lo alimenta de solución salina también el atomizador está conectado a la línea de aire que sale del humidificador y a la línea de solución salina que sale del tanque de reserva. Este grupo de elementos son los encargados de generar la niebla salina e introducirla dentro de la zona de exposición de la cámara, el aire de atomización es distribuido hacia el atomizador en el cual se produce un vacío que genera la succión del agua salina la cual transforma en niebla salina cuando pasa por el atomizador el cual funciona con un sistema piezoeléctrico que está en la parte inferior interna del tubo de acrílico esta se proyecta hacia la zona de exposición dentro de la cámara de ensayos de corrosión, es ahí donde la solución salina baja por la gravedad.

Figura 6

Base Interna para el piezoeléctrico y atomizador.



Nota. Adaptado de (Reyes, 2021).

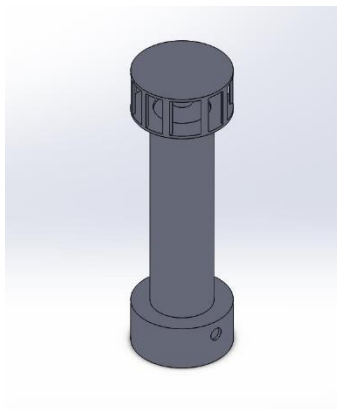
Para el del tanque auxiliar que se muestra en la figura 8, se consideraron los siguientes factores:

- Especificaciones sobre dimensiones de cámaras existentes en el mercado.

- Tamaño de la zona de exposición.
- Elemento seleccionado para atomizar la solución salina.
- Funcionalidad y practicidad didáctica del tanque de reserva, de modo que se puedan apreciar todos los fenómenos posibles presentes en el proceso de atomización.
- Ubicación de la alimentación de solución salina.
- Ubicación de la alimentación del aire de atomización.

Figura 7

Composición de tanque auxiliar ensamblado con la base de piezoeléctrico y atomizador de niebla salina.



Nota. Adaptado de (Reyes, 2021).

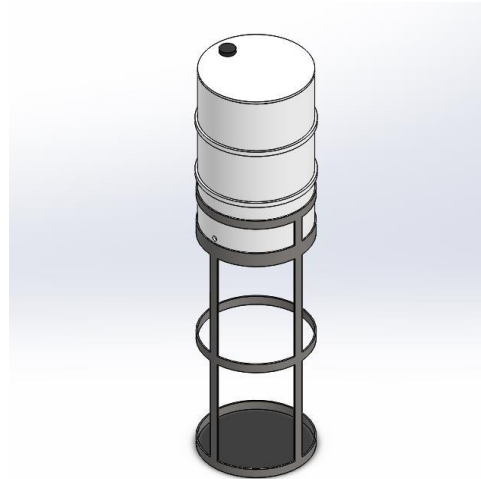
3.5.6 Sistema de Suministro de Solución salina

Este sistema es el que alimenta el proceso de generación de niebla salina, ya que es el que provee de solución salina al tanque de reserva de la cámara de niebla salina por medio de la gravedad, este sistema está constituido por una base estructural de ángulo de 3/4 pulgada con solera como soporte de esta base, con un tanque distribuidor en el cual se aloja el suministro de solución salina y que conecta con una línea al tanque de reserva de la

cámara de niebla salina, y estará elevada a altura aproximada de 1 metro. La estructura debe ser pintada con anticorrosivo.

Figura 8

Sistema para el suministro de la solución salina



Nota. Adaptado de (Reyes, 2021).

3.5.7 Conexiones Eléctricas:

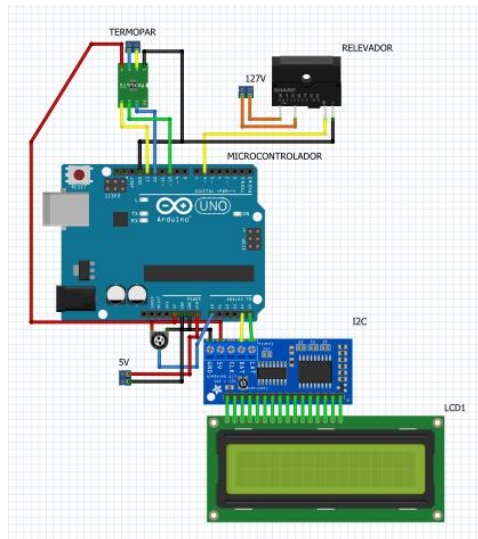
3.5.7.1 conexiones del controlador de temperatura:

En el circuito de conexiones eléctricas en la figura 9, se aprecia las conexiones del controlador de temperatura, automatizada por medio de un microcontrolador. El funcionamiento lo define el microcontrolador leyendo los datos de temperatura y comparándolo a un punto de referencia introducido por medio del potenciómetro y activando o desactivando el relevador que controla el calefactor de cerámica logrando la estabilización de la temperatura en el prototipo.

La pantalla tiene como funcionalidad proyectar los datos del punto de referencia y la lectura en tiempo real del sensor de temperatura.

Figura 9

Controlador de temperatura



Nota. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

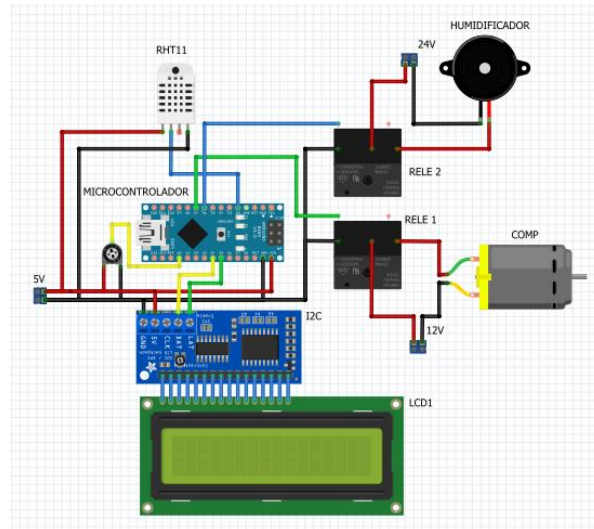
3.5.7.3 Conexión de generador de niebla ultrasónico

En la figura 10, se detallan las interconexiones para controlar el porcentaje de la humedad relativa de la cámara de corrosión, cuyo funcionamiento se basa en establecer un punto de referencia para la humedad relativa dentro de la cámara, y controlar dicha humedad con el microcontrolador activando y desactivando el humidificador para la generación de niebla y el ventilador por tiempos intermitentes logrando esparcir la solución salina que proporciona la humedad, e incluyendo una retroalimentación por medio del sensor DHT11 se obtiene un circuito autónomo para el control de la humedad.

La pantalla LCD es utilizada para la proyección del parámetro de referencia de la humedad y para la impresión de la lectura en tiempo real del porcentaje de humedad relativa dentro de la cámara.

Figura 10

Controlador de temperatura



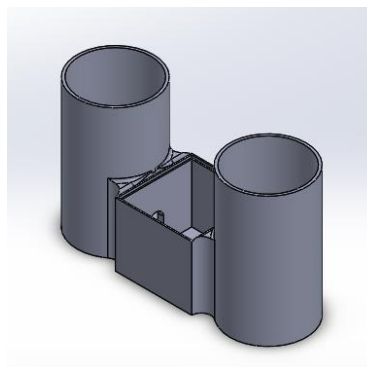
Nota. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

3.5.7.4 Conexión de bomba de agua y temporizador.

Para el control del nivel de agua utilizado por el humidificador, se realiza dos contenedores para el humidificador y un depósito de agua interconectados. Ver figura 11

Figura 11

Conectores interconectados



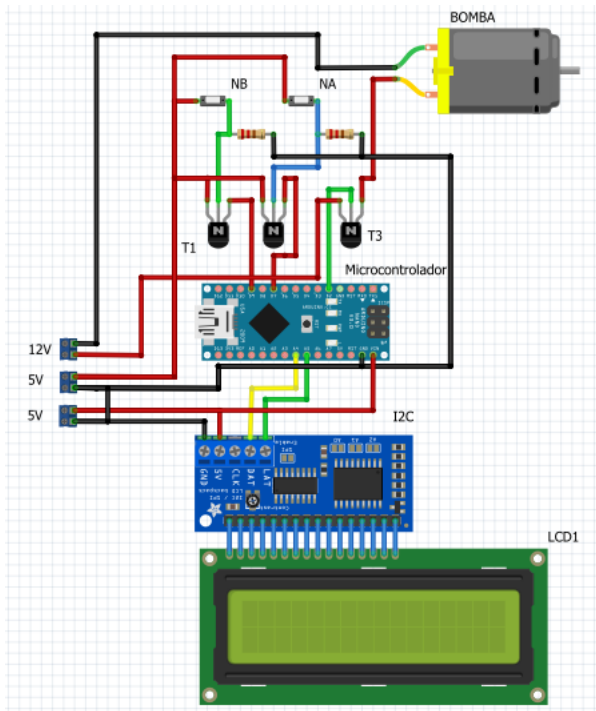
Nota. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

Para mantener el nivel de agua en el contenedor se aplica un sensor de nivel en el cual se incluyen dos niveles, nivel alto y nivel bajo, con el cual se controla el encendido y apagado de la bomba inyectora de agua.

En el circuito mostrado en la figura 12 la pantalla proyecta el tiempo de operación transcurrido de la cámara en modo activo.

Figura 12

Control de nivel de agua



Nota. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

4. Resultados

A continuación se presentan las imágenes de la cámara de niebla construida, con base en la metodología desarrollada, y con el apoyo del trabajo de residencia profesional y

tesis de alumnos del Instituto. Es importante mencionar, que con dichos trabajos se sentaron las bases para un prototipo inicial, que sirvió para los requerimientos que debería cumplir la cámara. Las figuras 13 y 14 presentan las etapas del armado e interconexión del prototipo resultante.

Figura 13

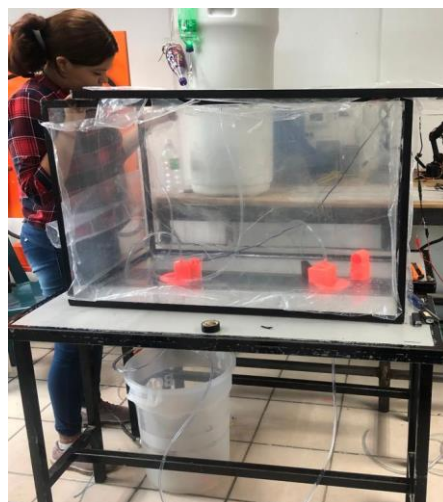
Armado y conexión de la cámara de niebla diseñada.



Nota. Adaptado de (Ruíz, 2022).

Figura 14

Interconexión de los componentes de la cámara de niebla diseñada.

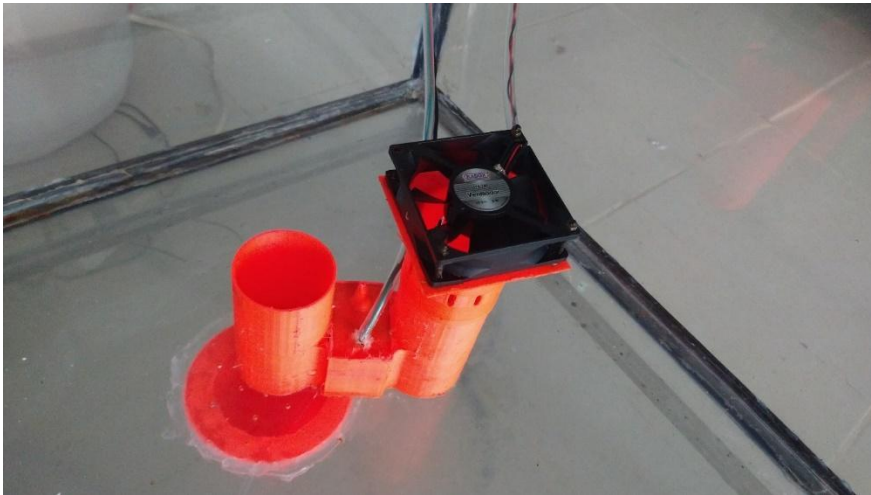


Nota. Adaptado de (Ruíz, 2022).

Se desarrolló por medio de manufactura aditiva un contenedor capaz de permitir el funcionamiento del humidificador y la expansión de la niebla generada, el cual se observa en la figura 15. Este contenedor es indispensable para permitir el proceso de humidificación para las pruebas realizadas.

Figura 15

Contenedor construido

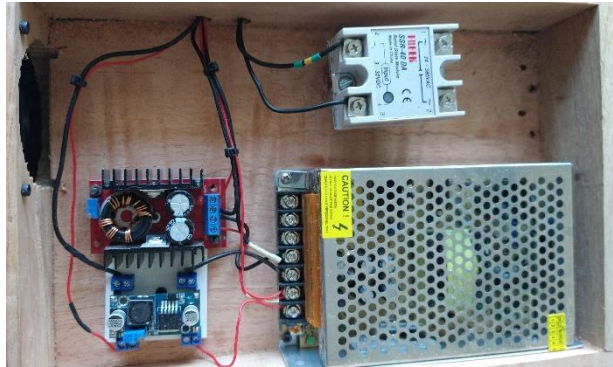


Nota. El contenedor construido con base en el diseño realizado en la metodología. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

En el sistema de alimentación se instalaron las fuentes de alimentación para los circuitos utilizados, utilizando un regulador de voltaje que proporciona 12v en corriente directa, un amplificador de voltaje para la obtención de 24V y un reductor de voltaje a 5V para la alimentación de los microcontroladores, de igual manera, se agregó el relevador de control para el calefactor y un ventilador para evitar sobrecalentamiento en los componentes como se muestra en la figura 16.

Figura 16

Sistema de alimentación

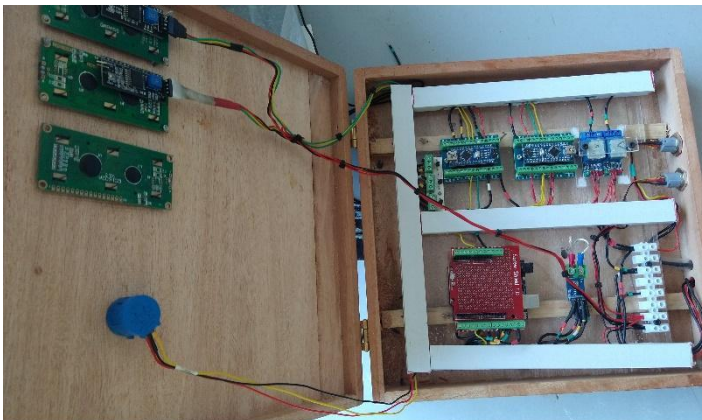


Nota. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

En el sistema integrado de control (Figura 17) se incluyen los tres sistemas de control antes mencionados (sistema de control de temperatura, sistema de control de humedad, sistema de control de nivel de agua y temporizador).

Figura 17

Sistema de alimentación



Nota. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

Como resultado de la investigación se pudo sistematizar los efectos que se pueden determinar con el uso de la cámara, además de puntualizar las diferencias de potencia de consumo eléctrico, que es la principal característica de la propuesta. En la figura 18 se presenta la revisión posterior a la caracterización del equipo presentado. Los ensayos pueden durar desde 3 días hasta 7 días, por lo que la toma de datos depende de la periodicidad o intervalo de tiempo en el que se notan cambios en las probetas.

Figura 18

Cámara de niebla construida



Nota. Revisión y supervisión por parte de los investigadores. Adaptado de (Vasquez & Velázquez, 2022).

Se utilizaron probetas de acero grado ingeniería SAE 1045, cubierta con resina epoxica dejando un área expuesta de 0.125 cm^2 . Estas pruebas se llevan a cabo colocando las piezas a analizar entre 15° y 30° de la vertical, con vapor de sal a una concentración de 5% en peso, temperatura de 35° C y un flujo de la solución de 500 mL/h , durante la prueba se debe garantizar que se conserven los parámetros anteriormente descritos. Tomando los datos de la cámara se determino que se puede calcular:

- El grado de corrosión del material.
- El grado de degradación del recubrimiento.
- Peso perdido del material.
- Cambios en la resistencia a la tracción.

Por otro lado, generar aire comprimido requiere de un sistema de compresión, por lo que normalmente se requieren consumos de entre 250 W a 750 W, con valores que rondan los \$100 dólares. Se utilizaron dos discos con potencia total de 40 W, por lo que la reducción de consumo considerando que se utiliza un compresor de 250 W es del 84%, mientras que para uno de 750 W es de 94%. El costo de los dispositivos piezoeléctricos fue de un total de 40 dólares, por lo tanto el ahorro fue del 60%. Cabe mencionar, que el espacio necesario para la instalación del prototipo es del 50%, debido a que no requiere equipo adicional. Los resultados antes mencionados no dependen de la temperatura, sino de la velocidad de respuesta de la humedad interna de la cámara que es de aproximadamente dos minutos. En el caso de la regulación de temperatura, los dispositivos propuestos no representan una perturbación considerable, consiguiendo un tiempo de estabilización de aproximadamente 5 minutos.

5. Discusión

Los resultados muestran que se pueden realizar pruebas de corrosión a probetas de acero para aplicaciones de ingeniería, ello en consonancia con lo manifestado por Novoa y Alfaro (2019), quienes concluyeron que se puede llevar a cabo, el estudio de las propiedades anticorrosivas a esculturas de valor artístico y arquitectónico sometidas al aerosol marino, utilizando dispositivos piezoeléctricos. En concordancia con Aldhubaie et al. (2018) quienes aseveran que se puede desarrollar una cámara de niebla salina con equipos de bajo costo, de modo que sea de fácil adquisición para laboratorios con fines educativos y que cumplan con las normas ASTM establecidas. En el trabajo antes mencionado se implementó un controlador STC-1000 para regular la temperatura, en conjunto con un sensor NTC

impermeable y una resistencia calefactora de 100 W. Con la diferencia que el dispositivo embebido utilizado, permite flexibilidad para cambiar la estrategia de control o código de funcionamiento según las necesidades de la aplicación.

6. Conclusiones

El diseño y construcción de la cámara de niebla salina satisface plenamente los requerimientos establecidos por las normas ASTM B 117 cuando se prueba en vacío. Sin embargo, se hace necesario realizar un ensayo de corrosión referencial.

La construcción de la cámara de niebla salina se realizó con materiales inertes y por lo tanto no corrosivos, tal es el caso del acrílico, y en el caso de la estructura, que fue pintada con anticorrosivo. Se considera que el tiempo de vida útil del prototipo construido no se debe ver afectado por la corrosión de sus partes. El usuario debe tener con los conocimientos del equipo y así cumplir con los objetivos propuestos. El equipo construido es seguro y confiable, además de presentar beneficios didácticos, por estar a la vista del usuario tanto las probetas como toda la instrumentación, lo que facilita el estudio del fenómeno de corrosión que se está analizando y también por el funcionamiento en sí, de la cámara.

Se realizó el diseño para la programación del sensor de temperatura y el funcionamiento óptimo de un piezoeléctrico para el desarrollo de la neblina de una cámara que recrea un ambiente de niebla salina para ensayos de corrosión cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados inicialmente en este trabajo

El desarrollo de los circuitos de la cámara de niebla salina simplifica muchos procesos a la hora de medir la durabilidad de los materiales metálicos, hasta su punto de corrosión, lo cual es muy precisa y rápida. El controlador de temperatura instalado permite toma de lecturas, periódicas de forma fácil y rápida. Se recomienda verificar que el funcionamiento del equipo sea correcto antes de realizar una prueba.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el recurso económico otorgado por el Programa de Desarrollo al Profesorado (PRODEP) como resultado de la Convocatoria de Fortalecimiento a Cuerpos Académicos en Formación, con lo que se financio este proyecto de investigación.

De igual forma a los alumnos colaboradores para la realización de este proyecto, los residentes y a los tesisistas, quienes fueron parte fundamental en la realización del prototipo resultante. Y sobre todo a los investigadores que se menciona en el estado del arte, cuyas aportaciones contribuyeron a un mejor resultado.

Al CONACYT por el apoyo otorgado a través de la convocatoria FORDECYT PRONACES/845101/2020 al proyecto DAMA-Descubrimiento acelerado de materiales antibioincrustantes.

Referencias

- Aldhubaie, A., Alyamani, R., Welch, T., Hill, S., Mihut, D., & Afshar, A. (2018). Development of a Salt Fog Corrosion Test Apparatus. *ASEE Southeastern Section Conference*.
- B. Susa, J. A. (2020). Automatic Room Humidifier and Dehumidifier Controller using Arduino Uno. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9(2), 2208–2212. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/198922020>
- bin Li, & Jinhui Lei. (2011). Design of industrial temperature monitoring system based on single chip microcontroller. *2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS)*, 342–344. <https://doi.org/10.1109/CSSS.2011.5974595>
- Chandra Sekhar, B., Dhanalakshmi, B., Srinivasa Rao, B., Ramesh, S., Venkata Prasad, K., Subba Rao, P. S. V., & Parvatheeswara Rao, B. (2021). Piezoelectricity and Its Applications. In *Multifunctional Ferroelectric Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96154>
- Guerra-Bravo, E., Lee, H.-J., Baltazar, A., & Loh, K. J. (2021). Vibration Analysis of a Piezoelectric Ultrasonic Atomizer to Control Atomization Rate. *Applied Sciences*, 11(18), 8350. <https://doi.org/10.3390/app11188350>
- Lima-Rodriguez, A., Gonzalez-Herrera, A., & Garcia-Manrique, J. (2019). Study of the Dynamic Behaviour of Circular Membranes with Low Tension. *Applied Sciences*, 9(21), 4716. <https://doi.org/10.3390/app9214716>

- Malook, K., Khan, H., Ali, M., & Ihsan-UI-Haque. (2020). Investigation of room temperature humidity sensing performance of mesoporous CuO particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 113, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105021>
- Mirzabe, A. H., Hajiahmad, A., Fadavi, A., & Rafiee, S. (2022). Piezoelectric atomizer in aeroponic systems: A study of some fluid properties and optimization of operational parameters. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.05.008>
- Novoa Jerez, J. E., Alfaro Guerra, M. A., & Alfaro Alcaíno, I. A. (2019). Esculturas de acero: observaciones de corrosión e inhibición mediante una cámara de niebla salina, sensores y un microscopio de bajo costo. *Educación Química*, 30(2), 78. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.2.63134>
- Reyes, A. (2021). *Diseño y construcción de cámara de niebla salina para pruebas de corrosión*. Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta.
- Ruíz, F. (2022). *Diseño de la estructura metálica de una cámara de niebla salina*. Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta.
- Santra, S., Jana, U., Pal, S., & Ray, S. K. (2018). Humidity Sensing of Zinc Oxide Nanorods Based Prototype Using Arduino Uno Microcontroller Platform. *2018 IEEE SENSORS*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589853>
- Sirohi, J., & Mahadik, R. (2011). Piezoelectric wind energy harvester for low-power sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(18), 2215–2228. <https://doi.org/10.1177/1045389X11428366>
- Supriyo, B., Dadi, Warjono, S., Wisaksono, A., Astuti, S., & Utomo, K. (2018). PID Based Air Heater Controller Implemented With Matlab/Simulink and Arduino Uno. *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 28–32. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2018.8576955>
- Vasquez, A., & Velázquez, J. (2022). *Diseño e implementación de un tablero de control para una cámara de niebla salina*. Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta.
- Yan, Q., You, J., Sun, W., Wang, Y., Wang, H., & Zhang, L. (2021). Advances in Piezoelectric Jet and Atomization Devices. *Applied Sciences*, 11(11), 5093. <https://doi.org/10.3390/app11115093>